

Redressement de clichés aériens en utilisant des anomalies géophysiques comme points de calage.

Michel Dabas, Bertrand Chazaly

Citer ce document / Cite this document :

Dabas Michel, Chazaly Bertrand. Redressement de clichés aériens en utilisant des anomalies géophysiques comme points de calage.. In: Revue d'Archéométrie, n°25, 2001. pp. 5-23;

doi : 10.3406/arsci.2001.997

http://www.persee.fr/doc/arsci_0399-1237_2001_num_25_1_997

Document généré le 22/03/2017

Résumé

Dans le cadre de la réhabilitation du complexe thermal romain de Vieil-Evreux (Normandie, France), une étude a été entreprise combinant l'usage de clichés aériens et de prospections géophysiques électriques. Dans le premier temps de cette étude, une prospection électrique pôle-pôle a été déclenchée aux alentours de la partie fouillée des thermes, couvrant une surface de 2 ha à maille fine (1 m). Pour des raisons financières, il n'était pas possible de prospecter par les méthodes géophysiques une surface plus importante. Une exploitation de clichés aériens obliques remarquables pris pendant la sécheresse de 1976 a alors été décidée. Le redressement de ces photographies, grâce à un logiciel spécifique et en n'utilisant que des points de calage topographiques, n'a pas permis d'atteindre dans la restitution planimétrique des anomalies phytologiques la précision métrique demandée en archéologie. Ceci résulte surtout de l'absence d'un nombre suffisant de points de calage bien répartis géographiquement sur les clichés. Ce cas se produit très souvent pour toutes les photographies prises dans des régions céréalières d'openfield, là où précisément les anomalies phytologiques sont les plus nombreuses, mais où les limites cadastrales bougent très souvent... Nous avons alors testé la possibilité d'utiliser des anomalies géophysiques comme points de calage additionnels. L'hypothèse est qu'il existe une coïncidence spatiale entre des anomalies phytologiques visibles sur le cliché et des anomalies géophysiques, parfaitement repérées. Nous avons testé cette hypothèse en utilisant tour à tour différentes anomalies électriques (piles d'un aqueduc, murs d'un fanum, de sa cella, murs de la palestres). L'erreur RMS calculée en tenant de ces points a permis d'atteindre la précision sub-métrique cherchée (0,86 m sur 26 points) et valide donc l'utilisation d'anomalies géophysiques comme point de calage lors d'un redressement de clichés aériens.

Abstract

Within the frame of the rehabilitation of the roman thermal complex of Vieil-Evreux (Normandie, France), a study combining several aerial photographs and an electrical survey was undertaken. During the first part of this study, a pole-pole electrical survey was planned in the neighbourhood of the already excavated roman baths covering a surface of approximately 2 ha. As it was not possible, for financial reasons, to survey a wider area, it was decided to use several oblique airphotos taken during the drought of 1976. The rectification of these photographs, using a home-made software and ordinary Control Points, proved to be very disappointing in terms of accuracy (more than 1 m) because of the lack of control points in different areas of the photograph. This situation is not very rare specially in open-field areas where field boundaries are changing very often and where precisely crop marks are the more visible... As a solution, we have tested the possibility of using geophysical anomalies as additional control points in the rectification process. The assumption is that there exist well defined geophysical anomalies which can be related to visible aerial crop marks. This was tested with models taking into account several different geophysical anomalies (piles of an aqueduct, walls of a fanum with its cella and of angles of a palestres). The RMS error was lowered to 0.86 m and proved the feasibility of using geophysical anomalies as (additional) Control Points during the rectification of airphotos.

REDRESSEMENT DE CLICHÉS AÉRIENS EN UTILISANT DES ANOMALIES GÉOPHYSIQUES COMME POINTS DE CALAGE

Michel DABAS* et Bertrand CHAZALY**

Résumé : Dans le cadre de la réhabilitation du complexe thermal romain de Vieil-Evreux (Normandie, France), une étude a été entreprise combinant l'usage de clichés aériens et de prospections géophysiques électriques. Dans le premier temps de cette étude, une prospection électrique pôle-pôle a été déclenchée aux alentours de la partie fouillée des thermes, couvrant une surface de 2 ha à maille fine (1 m). Pour des raisons financières, il n'était pas possible de prospecter par les méthodes géophysiques une surface plus importante. Une exploitation de clichés aériens obliques remarquables pris pendant la sécheresse de 1976 a alors été décidée. Le redressement de ces photographies, grâce à un logiciel spécifique et en n'utilisant que des points de calage topographiques, n'a pas permis d'atteindre dans la restitution planimétrique des anomalies phytologiques la précision métrique généralement demandée en archéologie. Ceci résulte surtout de l'absence d'un nombre suffisant de points de calage bien répartis géographiquement sur les clichés. Ce cas se produit très souvent pour toutes les photographies prises dans des régions céréalières d'*openfield*, là où précisément les anomalies phytologiques sont les plus nombreuses, mais où les limites cadastrales bougent très souvent... Nous avons alors testé la possibilité d'utiliser des anomalies géophysiques comme points de calage additionnels. L'hypothèse est qu'il existe une coïncidence spatiale entre des anomalies phytologiques visibles sur le cliché et des anomalies géophysiques, parfaitement repérées. Nous avons testé cette hypothèse en utilisant tour à tour différentes anomalies électriques (piles d'un aqueduc, murs d'un *fanum*, de sa *cella*, murs de la paestre). L'erreur RMS calculée en tenant de ces points a permis d'atteindre la précision sub-métrique cherchée (0,86 m sur 26 points) et valide donc l'utilisation d'anomalies géophysiques comme point de calage lors d'un redressement de clichés aériens.

Abstract : Within the frame of the rehabilitation of the roman thermal complex of Vieil-Evreux (Normandie, France), a study combining several aerial photographs and an electrical survey was undertaken. During the first part of this study, a pole-pole electrical survey was planned in the neighbourhood of the already excavated roman baths covering a surface of approximately 2 ha. As it was not possible, for financial reasons, to survey a wider area, it was decided to use several oblique airphotos taken during the drought of 1976. The rectification of these photographs, using a home-made software and ordinary Control Points, proved to be very disappointing in terms of accuracy (more than 1 m) because of the lack of control points in different areas of the photograph. This situation is not very rare specially in open-field areas where field boundaries are changing very often and where precisely crop marks are the more visible... As a solution, we have tested the possibility of using geophysical anomalies as additional control points in the rectification process. The assumption is that there exist well defined geophysical anomalies which can be related to visible aerial crop marks. This was tested with models taking into account several different geophysical anomalies (piles of an aqueduct, walls of a *fanum* with its *cella* and of angles of a paestre). The RMS error was lowered to 0.86 m and proved the feasibility of using geophysical anomalies as (additional) Control Points during the rectification of airphotos.

Mots-clefs : Prospection aérienne, redressement, orthophoto, anomalie phytologique, anomalie géophysique.

Key-words : Aerial surveying, rectification, orthophoto, crop marks, geophysical anomaly.

1 - INTRODUCTION

La détection de sites archéologiques à partir d'un moyen aéroporté a une histoire déjà longue (années 1920 en Angleterre et 1950 en Europe du Nord) (Scollar, 1990). Branche de la géographie au départ, l'étude et l'exploitation des photographies aériennes est devenue une discipline à part entière.

Parmi les développements les plus récents en archéologie aérienne, l'utilisation d'ordinateurs peu onéreux pour la correction de l'image et le traitement du signal constitue une étape majeure de l'intégration de cette information géographi-

* CNRS, UMR7619, Université Paris VI, Boîte 105, 75252 PARIS Cedex 05.

** Terra Nova sarl., 7 place de la Nation, 75011 PARIS.

que à tous les autres supports d'information. Plus précisément, nous pensons que la photographie aéroportée, que ce soit par avion, cerf-volant, ballon, drone, hélicoptère ou satellite, ne sert plus uniquement de support «statique» pour la détection des sites archéologiques, et est en train de s'intégrer dans une dynamique de fusion avec d'autres types d'informations issus de capteurs au sol. Mais, pour combiner ces sources d'information, il faut disposer d'une unité commune de mesure (géoréférencement). Le processus qui consiste à transformer une photographie, oblique ou non, en un document cartographique (échelle, direction et unité de mesure connues) s'appelle une orthorectification. C'est le problème classique de la photogrammétrie. Il existe de nombreuses méthodes manuelles, géométriques, optiques ou informatiques pour effectuer cette transformation. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux moyens informatiques à la portée maintenant de tous les ordinateurs du commerce et donc de l'archéologue, contrairement aux machines (photorestituteurs) utilisées en photogrammétrie et qui restent inabordables.

Nous nous restreindrons de plus au cas le plus simple, à savoir le redressement d'une seule photographie (monoscopie). Ceci oblige à ne pas considérer les effets d'un relief qui pourrait être calculé à partir des paramètres d'orientation du couple stéréoscopique. Par contre, si l'on dispose d'une autre source d'information, il est toujours possible d'inclure l'effet du relief. Nous aborderons dans un second article le redressement à partir d'un couple stéréoscopique et plus généralement le mosaïcage (aérotriangulation).

Il existe de nombreux logiciels informatiques pour le redressement, mais ils ne sont que peu utilisés pour l'instant par les archéologues. Les prix des logiciels «professionnels» ainsi que leur difficulté d'apprentissage en sont généralement la cause. Les clichés pris par les prospecteurs aériens depuis des décennies intègrent rarement la possibilité d'un redressement (il faut aussi photographier autour du site des points remarquables...) et sont donc très souvent inexploitable. Cette situation est en train de changer rapidement suite à trois tendances : 1) apparition de quelques logiciels gratuits ou très peu onéreux (Aerophoto du Prof. Scollar, Aerial de J. Haig Univ. de Bradford (Haig, 2000), Reimagae (Gandon et Langouët, 1992), Triphon de l'ENSAIS de Strasbourg (Grüssenmeyer), Orthophoto développé au CLDG de la Rochelle (Florsch et Yasar), 2) la possibilité d'acheter bientôt directement des cartes à composantes multiples (orthophotos, BDTopo, BDAlti, etc...), 3) la lambertisation en cours des cadastres (Service des Impôts), qui sont des documents juridiques garantissant la surface, mais pas les dimensions et encore moins les positionnements absolus.

En 1995, quand nous avons commencé notre étude, ces logiciels n'existaient pas (en France du moins) et nous avons essayé plusieurs logiciels professionnels, mais aucun n'était réellement ni utile, ni à la portée de l'archéologue. Le seul logiciel que nous avions finalement sélectionné a souvent donné des coordonnées fausses et a été abandonné par la suite, malgré un prix d'achat élevé (plus de 10kF). Par ailleurs, plusieurs «morceaux» de logiciels existaient dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG), mais étaient soit trop complexes à utiliser (GRASS par exemple), soit ne correspondaient qu'à un redressement «simplifié» (IDRISI ou MapINFO). De plus, dans de nombreux logiciels, nous avons été étonné de ne voir aucune trace du calcul d'erreur sur les Points de Calage ou sur les paramètres de la projection. Ces calculs sont pourtant nécessaires car ils fournissent une idée sur les limites d'application et/ou sur la précision des images redressées, ce dont beaucoup d'archéologues, très satisfaits d'un redressement "standard", ne sont pas conscients (par analogie, ceci reviendrait à fournir à un archéologue l'âge d'un objet analysé sans préciser la fourchette d'estimation...). Cette tendance est amplifiée par l'apparition dans les logiciels usuels de traitement d'image (Adobe Photoshop, Illustrator), de fonctions de plus en plus sophistiquées qui permettent de «superposer des images» n'importe comment (wrapping, etc...).

Ceci nous avait amené à développer notre programme de redressement. Toutes les figures de cet article ont été obtenues avec ce logiciel. Il est clair que ce programme, obsolète maintenant, peut être avantageusement remplacé par Aerophoto par exemple.

Pendant ce développement, nous nous sommes vite heurtés au problème de la répartition des Points de Calage (CP). Rappelons que les CP sont des points dont les coordonnées géographiques sont parfaitement connues et qui sont aisément identifiables sur les clichés aériens. Ces points doivent être suffisamment nombreux, bien répartis sur le plan topographique, facilement repérables et... stables dans le temps, au moins entre le temps de la prise de photo et le temps du document qui a servi à établir la carte topographique...

De la théorie à la réalité, il y a un long chemin. Il est rare qu'un prospecteur aérien ait ces contraintes en tête dans l'avion : sa concentration est orientée vers la détection des formes dans le paysage plus que par le fait de trouver de «bons» points de calage... Mais, d'un autre côté, il existe des millions de clichés pris par de nombreux prospecteurs aériens expérimentés à une époque où les logiciels et les PC n'existaient pas et où les pratiques agricoles modernes n'avaient pas encore fait disparaître la trace de nombreux sites (cf. St Joseph par exemple).

Pour toutes ces raisons, nous avons décidé d'étudier un nouveau type de point de calage.

2 - ANOMALIES AÉRIENNES ET ANOMALIES GÉOPHYSIQUES

Avant de rentrer dans les détails, rappelons les types d'indices sur lesquels le prospecteur aérien se base (Agache, 1978 ; Ferdière, 1998 ; Delétang, 1999). On peut faire tout d'abord la différence entre structures encore visibles à la surface du sol (microreliefs par exemple) et structures enfouies. Dans le premier cas, les sites peuvent être détectés par leur ombre en lumière rasante ou par une inondation mettant en évidence certains traits morphologiques. Dans le second cas, la détection sera dite «indirecte» et le site ne sera détecté que s'il possède un contraste d'une propriété physique par rapport à son environnement, tout comme en géophysique :

- contraste de propriétés mécaniques, comme la densité ou la dureté (détection par érosion différentielle par exemple ou par un labour profond),
- contraste de réflectance spectrale (différence de couleur d'ateliers métallurgiques, de traces de déforestation),
- contraste de propriétés thermiques (inertie thermique, diffusivité, chaleur latente) comme lors de la fonte différentielle de la neige ou de gel,
- et, de manière plus importante, contraste du contenu en eau (qui d'ailleurs peut se traduire en

contraste de couleur et/ou chaleur) qui se voit comme des anomalies de croissance de certaines plantes (indices phytologiques). Ces traces apparaissent majoritairement sur les plaines cultivées plutôt que sur les prairies et les zones boisées.

Bien sûr, ces facteurs sont généralement interdépendants : un sol qui a une charge plus importante en matériaux fins, sera plus humide, de couleur plus foncée et plus froid pendant une phase de réchauffement.

Une augmentation ou une diminution du contenu en eau du sol autour d'une structure archéologique aura plusieurs conséquences :

- La présence d'une structure archéologique enfouie à côté des racines de plantes cultivées peut l'empêcher de s'enraciner plus profondément. La croissance de la plante sera plus lente (différence de hauteur des tiges particulièrement visible en lumière rasante). Le mûrissement sera plus rapide et la plante plus fragile (visible par le fauchage des tiges après le vent).

- L'absence de la structure (structure en négatif comme des fossés), induit un sol localement plus humide et parfois moins dense. La croissance de la plante sera meilleure, les tiges plus hautes et le mûrissement retardé. Ce dernier cas est plus courant que le précédent.

Dans certaines conditions, l'influence de la structure enfouie ne sera pas très visible, mais il sera possible de mieux la visualiser en utilisant un film sensible au proche infra-rouge. L'absorption de cette partie du spectre par la plante est en relation directe avec son taux de chlorophylle qui est lui-même en relation avec son état de stress. Dans d'autres cas, les structures resteront invisibles suite à des conditions climatiques défavorables ou au fait que les structures sont trop profondes pour influencer le réseau racinaire des plantes.

2.1 - AVANTAGES DES CLICHÉS AÉRIENS

La prise de vue aérienne oblique est très rapide et simple si les conditions météorologiques sont favorables. La photographie peut être prise à partir d'un avion, d'un ballon, d'un cerf-volant ou de tout autre engin volant avec un simple appareil photo. Dans certaines régions en France, la couverture est excellente mais d'autres régions sont presque vierges. Bien sûr, l'extension de cette couverture aérienne est plus le reflet de la répartition des archéologues aériens et des terres labourées que celle des sites archéologiques. Par contre, il ne faut perdre de vue la nécessité de voler plusieurs fois sur le même site, généralement pendant plusieurs années, afin d'obtenir les meilleures conditions (sol et plante).

Une couverture complète (quasi-verticale) de la France est assurée régulièrement par l'IGN. On peut souvent disposer d'au moins dix missions dans le domaine panchromatique et IR depuis la dernière guerre mondiale quelle que soit la commune étudiée. L'échelle de ces photographies, proche souvent du 1/30 000, est malheureusement trop petite pour être facilement exploitable par l'archéologue. Le temps de la prise de vue n'est de plus pas forcément optimal pour la détection archéologique. Nous avons de plus constaté une grande différence de qualité entre le tirage papier ou même le CDROM vendu par l'IGN et l'examen du négatif original (non accessible au public pour l'instant) qui fait qu'une partie de l'information n'est pas disponible. Signalons quand-même l'existence de certaines missions avec des échelles plus utilisables comme le 1/8 000.

Par comparaison avec les autres méthodes de détection, le coût de la prospection aérienne est moindre. Mais, il faut se rappeler que les magnifiques clichés sont souvent le résultat de plusieurs années d'observation...

2.2 - INCONVÉNIENTS DES CLICHÉS AÉRIENS ET COMPLÉMENTARITÉ AVEC LA GÉOPHYSIQUE

Les clichés aériens ne détectent que ce qui est «visible» en surface. En fonction du type de culture, de la composition du sol, de la saison, la visibilité de structures archéologiques enfouies peut changer extrêmement rapidement : certaines structures ne peuvent apparaître que dans des conditions très spéciales. La prospection aérienne est bien sûr plus compatible avec une archéologie patrimoniale (carte archéologique) qu'avec l'archéologie de sauvetage. De plus, même en cas de conditions favorables, il faut que l'avion et son équipage soient prêts au bon moment... Mais un coût faible et une bonne infrastructure permettent un suivi efficace des sites déjà repérés.

Malheureusement, comme pour la prospection géophysique, toutes les anomalies détectées ne sont pas liées à l'archéologie. Le labour nuit souvent à la visibilité, spécialement dans le cas où il est dans le même sens que les structures archéologiques. D'autres causes, comme les marques d'engins agricoles, les traces d'animaux, les ronds de champignons ou les structures pédologiques compliquent l'interprétation de l'image.

Finalement, la précision de positionnement des structures pose des problèmes. Souvent, il est impossible de redresser la photo (angle trop oblique, pas assez de points de calage, etc.) et, même si cela est possible, la précision n'est pas suffisante pour l'archéologue. *A contrario*, la prospection géophysique (électrique ou magnétique par exemple) va permettre une précision de positionnement infra-métrique mais sur une surface restreinte de quelques hectares, ce qui implique que l'on ait disposé d'indices pour prospecter précisément sur ces hectares. La prospection géophysique pourra être entreprise à n'importe quel moment de l'année et normalement n'a pas besoin d'être refaite plusieurs fois.

Enfin, les traces repérées par la prospection aérienne correspondent à des structures très superficielles (moins de 40 cm). On voit donc qu'il y a déjà une sorte de complémentarité entre l'apport, au niveau de la détection, des méthodes aériennes et géophysiques. Nous allons étendre cette complémentarité en montrant une nouvelle utilisation de la géophysique pour le positionnement des clichés aériens.

3 - RECTIFICATION

La transformation de l'image d'un site enfoui, dans notre cas un cliché aérien, oblique ou non, en une autre image qui est une carte géographique (possédant origine, métrique, orientation, échelle), demande une connaissance du type d'appareil photographique utilisé, de son positionnement dans l'espace et de l'altitude des points du terrain photographié (Modèle Numérique de Terrain, MNT, DEM en anglais).

Le résultat d'une telle transformation s'appelle une orthophotographie (*orthos*= droit) : c'est l'image que l'on obtiendrait avec une caméra idéale (sans distorsions) à la verticale précise du lieu (pas d'effet de perspective). Cette orthophoto peut être superposée à une carte géographique par une simple rotation, translation et homothétie.

Dans les redressements de photos aériennes en archéologie, on simplifie le problème en considérant :

1- que la caméra est idéale, ce qui est loin d'être le cas pour des clichés en 24x36 et encore plus avec les appareils photo numériques actuels (en photogrammétrie, on dispose d'un fichier traduisant la déformation radiale de l'objectif : certificat d'étalonnage),

2- que l'on ne redresse qu'un cliché à la fois (pas de stéréoscopie, seule solution pourtant pour avoir un MNT directement).

Plusieurs formulations mathématiques peuvent néanmoins être envisagées, mais il est clair que l'on atteindra difficilement la précision de la photogrammétrie. Toutes les formules utilisent les coordonnées géographiques X, Y, Z d'un ensemble (leur nombre est fonction de la méthode) de points dits de calage (CP) parfaitement identifiables sur la scène. Ces coordonnées sont issues de cartes ou de prospections au sol. Les coordonnées en France sont exprimées dans le système Lambert avec quatre zones fonction de la latitude des points.

La précision de la transformation sera essentiellement fonction de la précision des coordonnées des points de calage et surtout de leur positionnement à l'intérieur de la scène. Ceci est la clé du problème sur laquelle nous nous attarderons à partir d'exemples numériques. Ces CP sont souvent des poteaux (faire attention à EDF qui change souvent la position de ses poteaux de quelques mètres !), pignons et angles de maisons, intersections ou angles de chemins, points fictifs obtenus par alignement, etc.

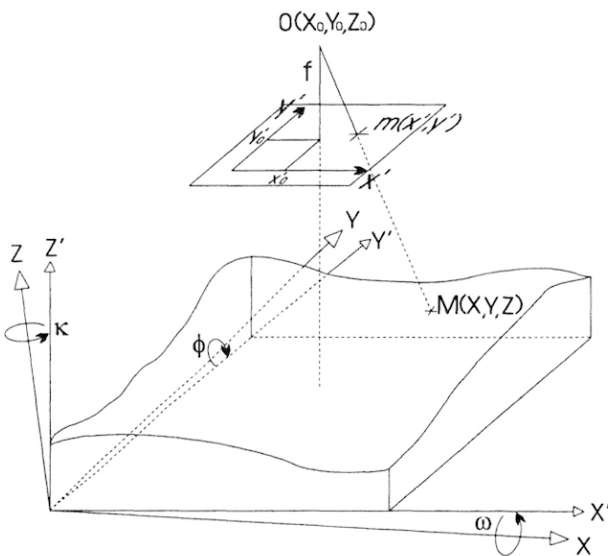
Les critères de sélection des CP selon notre expérience sont les suivants :

- ils doivent être parfaitement identifiables sur le cliché et sur la carte,
- ils doivent être le plus petit possible à l'échelle à laquelle on travaille,
- leur position doit être connue avec une précision meilleure que celle de l'orthophoto que l'on cherche à construire.

Le mieux est évidemment d'implanter soi-même ses propres CP (deux feuilles d'aluminium croisées par exemple) avant une mission aérienne. Ceci est très rarement le cas, sauf lors de survol d'un site en cours de fouille par exemple.

Plusieurs erreurs sont classiquement commises : pour les points éloignés du centre du cliché, il est très difficile par exemple d'estimer la base d'un mur ou la position d'un objet avec une ombre bien marquée. Enfin, dans les grandes plaines, les limites cadastrales, voire même les bordures de route goudronnée (toujours prendre l'axe), sont très fluctuantes.

3.1 - Formulation générale de la projection : l'orthophotographie



Un cliché correspond à la projection d'une surface sur un plan. A partir des paramètres de la projection, il est possible de calculer la position de n'importe quel point du cliché $m(x', y')$ à partir des coordonnées du point correspondant au sol $M(X, Y, Z)$.

Le redressement indirect numérique d'un cliché scanné consiste à reconstruire une image, dont chaque pixel possède une intensité de gris ou de couleur correspondant au point du cliché dont les coordonnées sont calculées avec les équations de projection et l'altitude au sol de ce point.

C'est pourquoi on parle de redressement indirect : l'image originale n'est pas directement redressée, mais elle est formée à partir des pixels de l'image originale.

Les équations générales de projection, appelées aussi équation de co-linéarité (lettres minuscules pour les coordonnées cliché, lettres majuscules pour les coordonnées terrain) sont :

(voir (Scollar, 1990) pour plus de développements) :

$$(x' - x'_0) = -f \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$(y' - y'_0) = -f \cdot \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Les trois paramètres dits «internes» du cliché sont : x'_0 et y'_0 , coordonnées du point principal (P), et f distance focale (paramètres dits d'orientation interne).

Les six paramètres «externes» d'orientation sont : X_0, Y_0 et Z_0 coordonnées du centre de projection (O) et les coefficients de la matrice r_{ij} qui traduisent les 3 angles de rotation : ω, ϕ, κ :

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Soient (x'_c, y'_c) les coordonnées du point principal du scan du cliché. Ce sont des coordonnées pixel (attention l'origine est en bas à gauche et bon en haut à gauche comme en traitement d'image).

$(x'_c - x'_c_0) = k' \cdot (x' - x'_0)$ et $(y'_c - y'_c_0) = k' \cdot (y' - y'_0)$ où k' est la résolution du scan (par exemple $k' = 200/25.4$ (# 7.87) à 200 DPI). Les équations générales deviennent alors (9 inconnues) :

$$(x'_c - x'_c_0) = F = -f' \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)}$$

$$(y'_c - y'_c_0) = G = -f' \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)}$$

avec $f' = k' \cdot f$ (éq. 1)

En photogrammétrie conventionnelle, les paramètres d'orientation interne sont connus pour la caméra utilisée ainsi que ses paramètres de distorsion, les paramètres externes sont estimés dans un premier temps. Il ne reste plus alors que 6 inconnues. Seuls 3 CP sont donc théoriquement suffisants pour résoudre le système d'équation (deux équations de colinéarité pour chaque CP).

De façon pratique, il faut utiliser le plus de CP possible bien répartis sur la surface du cliché. Nous obtenons alors plus d'équations que d'inconnues et aboutissons à un système classique de moindres carrés. Pour tout CP on a :

$$x'_i \text{ mesuré} - x'_i \text{ calculé} = dx'_i = \frac{\partial x'_i}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial x'_i}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial x'_i}{\partial Z_0} dZ_0 + \dots + \frac{\partial x'_i}{\partial f'} df'$$

$$y'_i \text{ mesuré} - y'_i \text{ calculé} = dy'_i = \frac{\partial y'_i}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial y'_i}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial y'_i}{\partial Z_0} dZ_0 + \dots + \frac{\partial y'_i}{\partial f'} df'$$

$$dx' = \begin{pmatrix} dx'_1 \\ dy'_1 \\ \dots \\ dx'_n \\ dy'_n \end{pmatrix} = A * \begin{pmatrix} dX_0 \\ dY_0 \\ dZ_0 \\ \dots \\ df' \end{pmatrix} = A * dX \text{ (eq. 2)}$$

A est la matrice des coefficients différentiels calculés à partir de valeurs approximatives des paramètres (X_0, Y_0, \dots, f') (voir annexe I). Le redressement permet alors de calculer les incréments des paramètres (dX_0, dY_0, \dots, df') qui minimisent les différences $dx'_1, dy'_1, \dots, dx'_n, dy'_n$.

A partir de $dx' = A * dX$, les corrections à appliquer sont : $dX = (A.A)^{-1} \cdot A \cdot dx'$. Le seul problème qui puisse arriver est une instabilité lors du calcul de la matrice inverse ce qui signifie généralement que les CP sont mal répartis sur la surface, trop alignés, ou que les paramètres de départ (X_0, \dots, f) sont trop loin de la solution (problème non linéarisable).

Quand les corrections dX sont appliquées, l'équation 2 peut être résolue une seconde fois jusqu'à ce que les dx' atteignent un seuil défini (les variations convergent normalement vers zéro sauf les cas énumérés plus haut...). Nous avons généralement trouvé (les équations ont d'abord été implémentées sous Excel puis dans un programme en Pascal) que trois ou quatre itérations sont suffisantes si les CP sont bien répartis.

3.2 - Transformation «polynomiale»

Cette méthode utilise des équations polynomiales de différents ordres (généralement entre 1 et 3) dont les coefficients sont calculés à partir uniquement des coordonnées des CP. L'image résultante n'est pas *strictus sensu* une orthophoto. Les polynômes de degré 1 correspondent à un changement du système de coordonnées (translation et rotation dans un plan et changement d'échelle, ce que peut faire parfaitement une photocopieuse moderne...). Les polynômes d'ordres plus élevés permettent une déformation «élastique» de l'image, mais même un polynôme d'ordre 3 ne peut rendre compte de l'effet de perspective et/ou de relief. La signification physique des ordres élevés (≥ 2) de polynôme n'est pas évidente et peut correspondre à une déformation due à un défaut de l'optique utilisée entre autre.

Cette méthode est utilisée généralement pour le redressement de photographies déjà verticales et dont le relief est peu accentué (terrain plat et/ou dont le relief est négligeable par rapport à la hauteur de prise de vue comme pour les photos satellites). Elle peut être utilisée pour la transformation de plans déjà scannés. Cette transformation existe dans de nombreux SIG, comme IDRISI par exemple (fonction «resample»), mais nous attirons l'attention sur le fait qu'elle ne doit jamais être utilisée pour le redressement des photographies obliques en archéologie.

3.3 - Transformation différentielle ou méthode des 4 points

Cette méthode est très utilisée pour des photos obliques de surface quasi-planes. Elle prend en compte l'effet de perspective, mais pas le déplacement des pixels dus au relief. Les paramètres internes d'orientation de la caméra ne sont pas nécessaires. C'est la méthode la plus utilisée pour le redressement en archéologie.

Les équations fondamentales de colinéarité sont toujours employées, mais le nombre d'inconnues est plus faible puisque le terrain est supposé plat : l'altitude Z est une fonction des coordonnées X et Y : $Z = aX + bY + c$.

L'équation 1 peut être écrite plus simplement : si, pour tout point (x_i, y_i) du film, le point correspondant au sol (homologue) est (X_i, Y_i) alors :

$$x_i = \frac{a_1 \cdot X_i + a_2 \cdot Y_i + a_3}{d_1 \cdot X_i + d_2 \cdot Y_i + 1}, y_i = \frac{b_1 \cdot X_i + b_2 \cdot Y_i + b_3}{d_1 \cdot X_i + d_2 \cdot Y_i + 1}$$

$$\text{D'où, } X_i = \frac{(a_3 - x_i)(d_2 \cdot y_i - b_2) - (b_3 - y_i)(d_2 \cdot x_i - a_2)}{(d_2 \cdot y_i - b_2)(d_1 \cdot x_i - a_1) - (d_1 \cdot y_i - b_1)(d_2 \cdot x_i - a_2)},$$

$$\text{Et } Y_i = \frac{(b_3 - y_i)(d_1 \cdot x_i - a_1) - (a_3 - x_i)(d_1 \cdot y_i - b_1)}{(d_2 \cdot y_i - b_2)(d_1 \cdot x_i - a_1) - (d_1 \cdot y_i - b_1)(d_2 \cdot x_i - a_2)} \quad (\text{eq. 3})$$

Ce système d'équations a été utilisé avec succès pour la première fois par Palmer en Angleterre dans les années 70 (Palmer, 1970). Il nécessite 4 CP puisque le système est à 8 inconnues.

Les équations pour un ensemble n de CP ($n \geq 4$) peut être résolu par un moindre carré de la même façon que les équations complètes de la photogrammétrie.

Si l'on prend en considération l'altitude, on peut démontrer que 11 inconnues en résulte ce qui nécessite un minimum de 6 CP (de manière générale, on peut démontrer que des équations homomorphiques entre un espace de dimension M : \mathbb{R}^M vers un espace de dimension N : \mathbb{R}^N aboutit à $2x = (M+1) \cdot (N+1) - 1$ paramètres et donc nécessite la connaissance de x CP).

Ces équations (en 2D) ont été implémentées sous Excel® et les résultats sont présentés dans le prochain paragraphe. Puis un programme a été écrit en TurboPascal pour l'extension à 3D. Les fichiers résultants ont été créés pour être importés dans le SIG IDRISI (mode raster).

Il est possible, et même fortement conseillé, de résoudre analytiquement ces équations de telle manière à calculer les erreurs sur les différents CP ainsi que sur des points de coordonnées connues mais qui n'ont participé à l'inversion (points de contrôle). Les coordonnées peuvent être calculées en coordonnées film (pixels ou micron) et en coordonnées terrain (équation 2).

4 - APPLICATION

Nous avons décidé d'utiliser la méthode des 4 points avec différentes photographies aériennes obliques du site de Vieil-Evreux en Normandie. Ce site est bien connu depuis le siècle dernier quand il fut fouillé par des archéologues comme François Rever et Théodose Bonnin. De cette cité romaine (*Gisiacum* ?) qui est actuellement presque entièrement sous des champs cultivés sauf au niveau du village du Haut-Cierrey, seules deux parties sont encore visibles : un théâtre et un complexe thermal. Malgré les fouilles du siècle dernier, les limites de cette ville, ses axes urbanistiques ne sont pas encore connus. Mais de nombreux clichés obliques existent depuis plus de 20 ans (Cliquet *et al.*, 1996) et montrent une profusion d'anomalies phytologiques.

Dans le cadre de la réhabilitation des thermes pour le public, le Conseil Général de l'Eure et son archéologue départemental (Laurent Guyard), ont demandé la détection et la cartographie précise de tous les vestiges archéologiques aux alentours des thermes, les terrains étant achetés en fonction des emplacements de fouille. Dans une première phase en octobre 1996, une prospection géophysique électrique a été demandée, couvrant les environs des thermes (2 ha), pour localiser précisément (à moins de 0,5 m) des structures déjà connues (soit par les textes, soit par la photographie aérienne) comme la palestine et son péribole, ou découvrir de nouvelles (fig. 1).

Malgré le succès de la prospection électrique, celle-ci ne put être étendue à une surface plus grande pour des raisons financières. Pendant le mois de février 1997, nous décidâmes d'utiliser plusieurs photographies aériennes obliques exceptionnelles prises par R. Agache pendant la sécheresse de 1976 (SRA de Basse-Normandie). Ceci nous a permis d'étendre le périmètre de reconnaissance à 400 m autour de l'édifice thermal (fig. 2 et 3).

4.1 - DONNÉES TOPOGRAPHIQUES

Les données topographiques ont été obtenues par un cabinet de géomètre qui nous a fourni un fichier vectoriel avec 13 couches d'informations différentes (fichier autocad dxf). Ces données, collectées par le cabinet Hemmeneger pour le positionnement des fouilles et des vestiges des thermes existants, n'avaient donc pas pour but originel de fournir des points pour le redressement. Parmi les différentes couches du fichier dxf, trois ont quand même pu être utilisées et expor-



Fig. 1 : Prospection électrique Pôle-Pôle de la zone autour des thermes (les croix indiquent les abeilles du quadrillage Lambert II).

tées : le plan des fouilles actuelles, les murs encore visibles des thermes mis à jour au siècle dernier ainsi qu'une couche de «dessin» qui contient différents éléments linéaires comme les routes et chemins, les limites de champ, etc.

Ces couches importées dans notre modèle, ont permis d'obtenir les coordonnées (Lambert II) de quelques CP, mais très localisés autour des thermes. Il fut nécessaire d'aller sur le terrain et de positionner des points plus éloignés du complexe thermal afin d'avoir une couverture uniforme (points E, I, K, T et S de la figure 4) de la surface du cliché A.

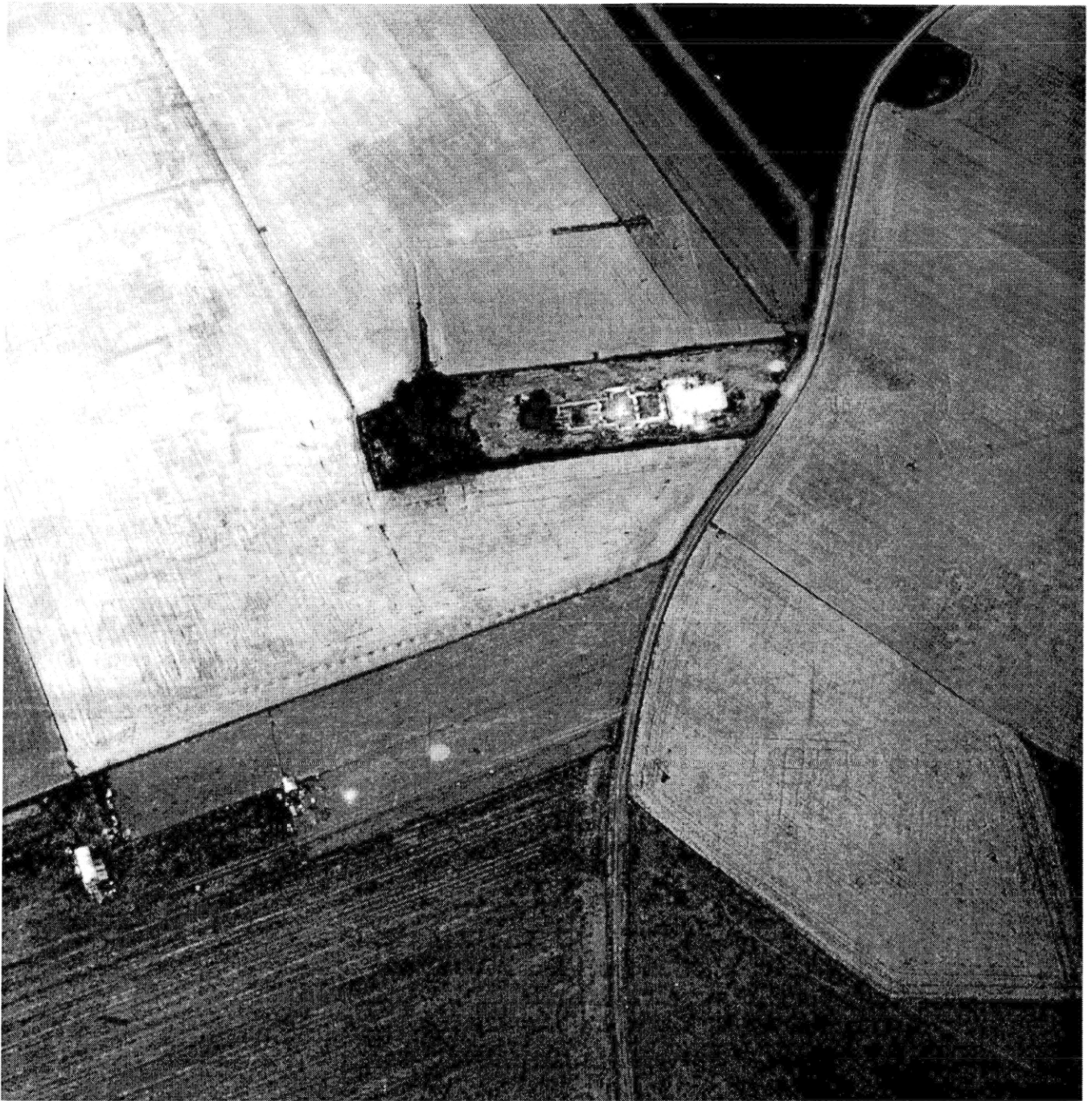


Fig. 2 : Photographie aérienne oblique A (avec augmentation de contraste) de R. Agache (1976).

4.2 - DONNÉES GÉOPHYSIQUES

La prospection électrique entreprise en octobre 1996 a permis d'obtenir une image en densité de gris avec des anomalies très claires et révélatrices des structures sous-jacentes. La méthode pôle-pôle a été utilisée (twin électrode avec des électrodes de potentiel et d'intensité très éloignées les unes des autres). L'espacement entre les lignes et entre les mesures est de 1 m. L'écartement entre les 2 pôles de mesure est de 0,9 m. La surface de 2,1 ha a été couverte en 4 jours (développement spécifique à Terra Nova d'un système d'«électrodes intelligentes» où le système prend la mesure automatiquement lorsque les électrodes sont dans le sol et surtout avec une précision constante quelle que soit la qualité des contacts électriques).

L'image (fig. 1) est géo-référencée dans le système Lambert II (pratiquement sur le terrain en utilisant 10 jalons dont les positions ont été vérifiées par un géomètre). Deux couches d'information ont été créées : une couche raster contenant les données de résistivité et une couche vectorielle contenant la position digitalisée de la plupart des anomalies.

Cette couche vectorielle a été utilisée pour le positionnement du nouveau type de CP que nous proposons pour le redressement des photos aériennes.

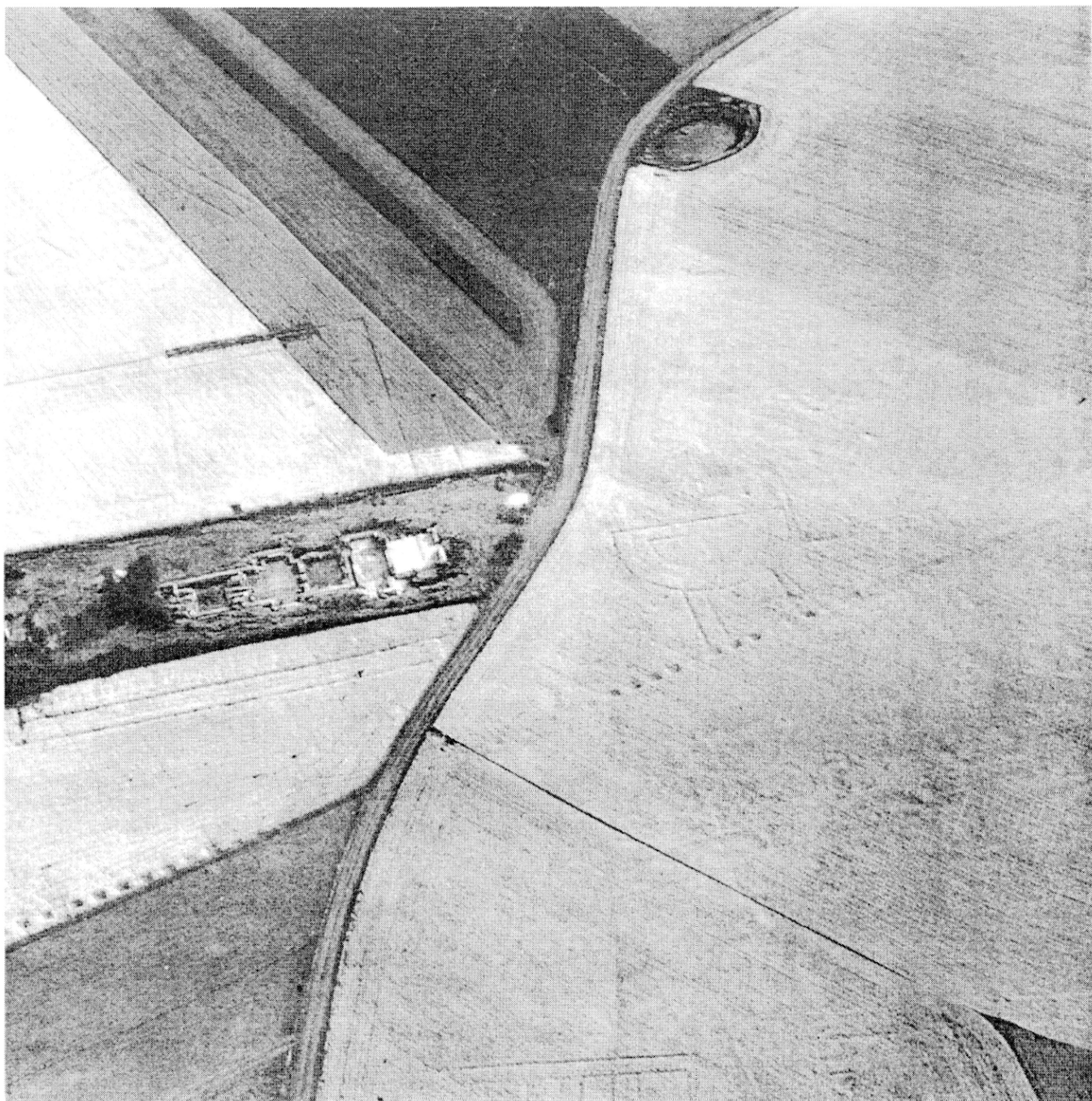


Fig. 3 : Photographie aérienne oblique B (avec augmentation de contraste) de R. Agache (1976).

4.3 - CLICHÉS AÉRIENS

Au début, nous avons pu bénéficier de 19 photographies fournies par une association locale (Archeo27, A. Etienne et X. Leudier) et par le SRA de Basse-Normandie (photos déposées par R. Agache). Parmi ce fonds, deux photographies prises par Agache pendant la sécheresse de 1976 ont été sélectionnées en fonction de nombreux indices dans la partie ouest (Photo A, fig. 2) et est du complexe thermal (Photo B, fig. 3). Les autres clichés ont juste été utilisés pour confrontation et comparaison des anomalies, en particulier pour les plus ténues.

Nous avons aussi sélectionné deux clichés verticaux IGN de la mission de 1984 (panchro et IR). L'échelle originale était de 1/20 000 et malgré quelques traces archéologiques visibles, ils ont été rapidement écartés en comparaison des clichés A et B de Agache. Ceux-ci ont été scannés en moyenne résolution (200DPI) en utilisant une palette de 256 niveaux de gris (clichés originaux en couleur, mais le logiciel de redressement n'opérait que sur des fichiers de 8 bits de résolution). La taille résultante des fichiers est de 10Mbytes, ce qui correspond à une résolution au sol de 5 cm à la verticale de la caméra et de 10 cm à l'extrémité de la photo (3874 x 2632 pixel pour la photo A et 4095 x 2736 pour la photo B). Une telle résolution est nécessaire si l'on veut garder la finesse originale du cliché.

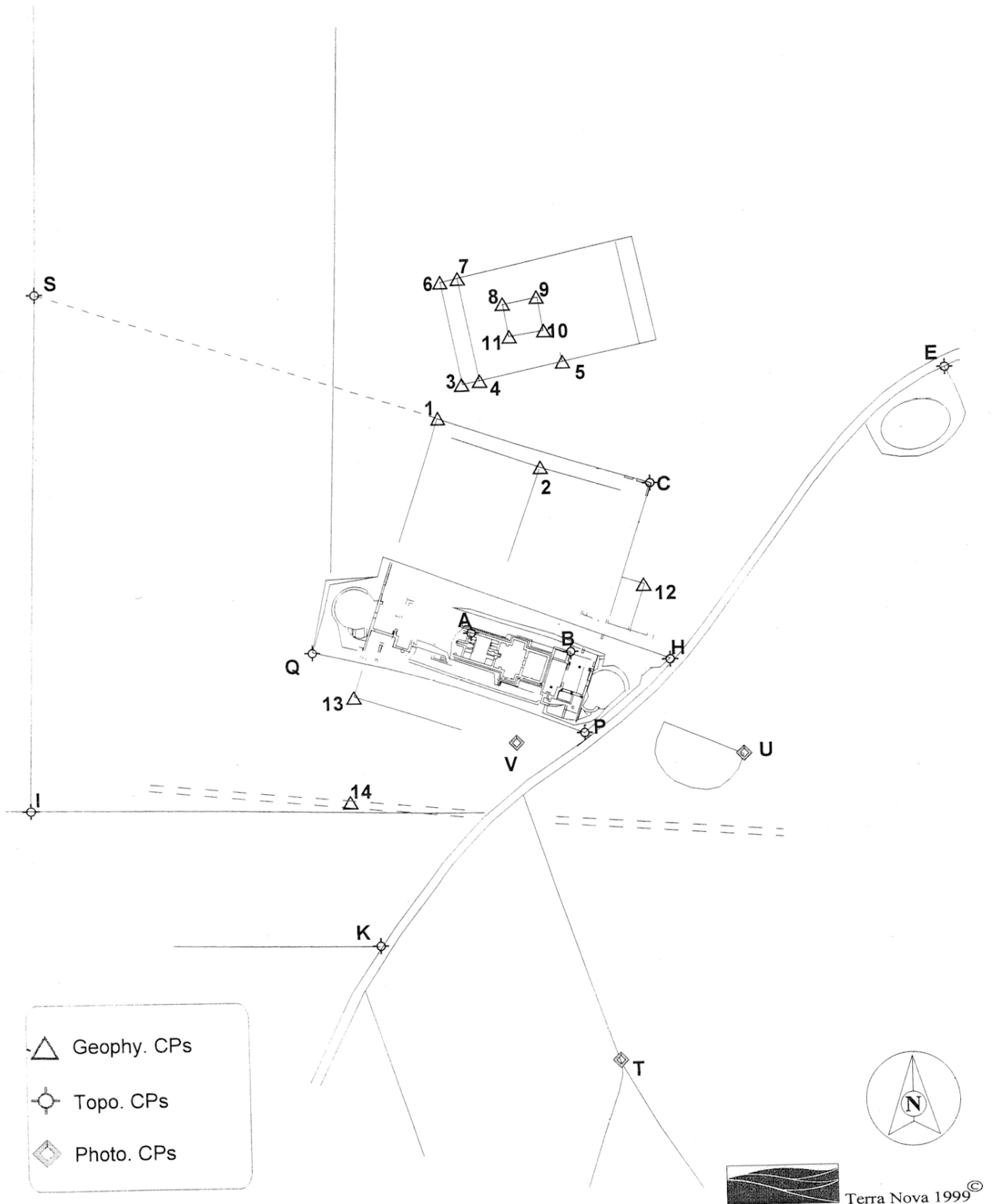


Fig. 4 : Position des CP utilisés pour la photographie A et B.

Le redressement est celui de l'image scannée et non celle de traces qui auraient été digitalisées sur le cliché. Nous pensons en effet, au contraire de ce qui est fait dans certains logiciels, que même si la charge calcul est beaucoup plus lourde, il vaut mieux que l'opérateur fasse ses choix et interprétations sur le cliché rectifié plutôt que sur l'original : la sélection des traces par l'opérateur relève souvent d'un processus d'identification de formes (géométriques) qui sont évidemment déformées sur le cliché original... Ceci n'est vrai bien sûr que s'il n'y a pas perte de résolution entre les clichés originaux et redressés (ce qui implique de travailler sur écran et non sur une copie papier qui ne permet jamais de restituer la totalité de la dynamique de l'image).

4.4 - COMPARAISON DES ESSAIS DE REDRESSEMENT

Nous avons utilisé quatre types de CP : ils sont numérotés #1 à #14 pour les points «géophysiques», A à K pour les points «ordinaires» topographiques, P à T sont des points supplémentaires rajoutés (fig. 4). Le points U à W sont des points «photographiques» utilisés seulement pour le redressement de la photo B (*i.e.* des points dont les coordonnées sont connues par le redressement du cliché A).

La méthode des 4 points a pu être utilisée puisque la topographie est quasi-plane (moins de 2 m de différence entre le point le plus haut et le plus bas).

Pour le premier essai (voir Tableau I), 11 CP ont été utilisés et nous avons calculé l'erreur sur les 21 points (incluant les CP utilisés pour le calcul des paramètres).

De ce premier essai, il est clair que parmi les points géophysiques, le CP#9 géophysique (angle NE de la *cella*) pourrait être à l'origine d'une grande partie de l'erreur. Il a été éliminé et CP#6 introduit pour un deuxième essai. Il doit exister une erreur pour la détermination du point R, mais à ce point du discours, ceci n'est pas important car R ne joue aucun rôle dans le calcul des paramètres. L'erreur moyenne calculée (sans R) est 3,8 m. Au deuxième essai, l'erreur moyenne a été réduite à 3,6 m, mais il existe toujours une erreur importante sur CP#6. Rappelons que dans un problème de moindre carrés, ceci ne veut pas dire spécialement que les coordonnées de ce CP soient fausses ; cela signifie seulement que les coordonnées d'un des CP ne sont pas exactes, et il est difficile de savoir lequel... Le problème est encore plus difficile quand il faut remettre en question plusieurs CP. La solution peut être approchée par des essais multiples : nous avons substitué S' à S. Maintenant, l'erreur sur CP#6 est faible et l'erreur globale tombe à 0,87 m ! Ceci montre clairement que le point géophysique CP#6 était correct. Il est clair aussi que les points R, J et S sont des points aberrants («outliers») et doivent être écartés (R correspond à l'angle d'une nouvelle porte dont la position a seulement été estimée sur la photographie de 1976 où elle n'existait pas, S résulte d'une erreur involontaire de digitalisation du point S' et J correspond à un bois dont la position a sûrement changée depuis 1976...). Nous avons enfin rajouté un nouveau point (T) pour tester la stabilité du système obtenu. L'erreur sur T obtenue est de 0,84 m ce qui est compatible avec l'erreur globale de 0,87 m.

Finalement, nous avons utilisé ces CP et les paramètres de la transformation pour construire l'orthophotographie (fig. 5) qui possède une erreur infra-métrique compatible avec le souhait de l'archéologue.

Pour la photo B, la même procédure a été appliquée. Si à peu près un tiers de la photographie A est couverte par des CP, seulement la moitié de la surface de B l'est. Pour gagner en précision, nous avons utilisé 3 CP supplémentaires dont les coordonnées sont issues du redressement de la photographie A (points U, V et W).

En utilisant les CP (6 - 14 - 16 - A - C - E - H - K - Q - U - V - W), l'erreur résultante moyenne du modèle est de 1,00 m avec une déviation standard de 0,65 m (voir annexe III).

La figure 6 montre les résultats de la digitalisation de différentes traces repérées sur la photo B rectifiée et superposée avec les traces issues de la digitalisation de la photo A rectifiée.

Malgré le fait que les deux photographies aient été prises presque en même temps et avec le même angle, il est intéressant de noter qu'elles n'apportent pas la même information. La photographie A est très riche dans les parties à l'ouest et au nord des thermes tandis que le cliché B montre des anomalies très claires au sud de l'aqueduc.

Plusieurs traces visibles sur les deux photographies permettent une comparaison au niveau géométrique. Six zones sont communes. Sur la région des thermes, l'erreur maximale observée est de 1,7 m. Sur le *fanum* : 1,4 m. Sur les piles de l'aqueduc 1,8 m ; 1,4 m sur le nymphé et finalement 1,8 m sur les traces rectangulaires au sud de l'aqueduc. Ces chiffres sont en accord avec les erreurs estimées dans les annexes II et III.

4.5 - VALIDITÉ DES POINTS GÉOPHYSIQUES EN TANT QUE CP

En examinant les résultats du tableau I pour le cliché A, il est clair que les différences calculées et vraies des CP géophysiques (CP#1 à 14) sont compatibles avec les différences calculées pour les CP topographiques. Ceci signifie que l'ordre de grandeur de précision des CP géophysiques est du même ordre que celui des CP topographiques.

Comme test, nous avons calculé un modèle de redressement en écartant tous les CP géophysiques (cas I, annexe IV). Il n'est pas surprenant de voir que la différence entre positions vraies et calculées des CP géophysiques soit plus importante que dans le cas II où l'on a utilisé les deux types de CP. La moyenne de la différence (rejetant encore les points faux R, J et S) est passé de 0,87 m à 0,96 m. Ceci signifie deux choses : 1) les CP géophysiques introduisent le même ordre de grandeur de précision que les CP topographiques classiques (bien que le degré de précision de connaissance d'un CP géophysique soit de l'ordre de 50 cm à comparer avec 5 cm pour un CP topographique) ; 2) leur introduction par conséquent a diminué l'erreur globale du modèle.

CP utilisés pour le calcul :			CP utilisés pour le calcul :			CP utilisés pour le calcul :			CP utilisés pour le calcul :		
2 - 9 - 12 - 14 - A - B - C - E - I - K - S			2 - 6 - 12 - 14 - A - B - C - E - I - K - S			2 - 6 - 12 - 14 - A - B - C - E - I - K - S'			2 - 6 - 12 - 14 - A - B - C - E - I - K - S' - T		
Paramètres calculés :			Paramètres calculés:			Paramètres calculés:			Paramètres calculés		
a1:	1,107348571		a1:	1,070959725		a1:	1,09198467		a1:	1,095871727	
a2:	-0,29127159		a2:	-0,280109779		a2:	-0,25502839		a2:	-0,26000042	
a3:	-823,745983		a3:	-795,8536182		a3:	-813,981726		a3:	-816,100156	
b1:	-0,32172681		b1:	-0,316389832		b1:	-0,35076459		b1:	-0,35093954	
b2:	-0,63723681		b2:	-0,61562219		b2:	-0,58520238		b2:	-0,59404011	
b3:	537,0686906		b3:	525,2916952		b3:	559,422363		b3:	561,5539515	
d1:	0,00059202		d1:	0,000545625		d1:	0,00056015		d1:	0,00057444	
d2:	0,001332346		d2:	0,001299735		d2:	0,001508		d2:	0,001459881	
Différences			Différences			Différences			Différences		
CP	Photo (mm)	Terrain (m)	CP	Photo (mm)	Terrain (m)	CP	Photo (mm)	Terrain (m)	CP	Photo (mm)	Terrain (m)
1	2,2	4,87	1	2,0	4,37	1	0,7	1,23	1	0,6	1,03
2	1,1	2,45	2	0,9	2,14	2	0,1	0,27	2	0,1	0,17
3	2,2	5,05	3	2,0	4,52	3	0,5	0,94	3	0,4	0,70
4	2,1	5,05	4	1,9	4,53	4	0,2	0,32	4	0,1	0,17
5	1,6	4,08	5	1,4	3,67	5	0,2	0,34	5	0,3	0,52
6	3,7	8,90	6	3,4	8,15	6	0,8	1,50	6	0,7	1,46
7	3,2	7,96	7	2,9	7,23	7	0,6	1,02	7	0,4	0,73
8	2,5	6,21	8	2,2	5,60	8	0,2	0,47	8	0,1	0,15
9	2,5	6,33	9	2,3	5,76	9	0,2	0,40	9	0,1	0,33
10	1,9	4,79	10	1,7	4,31	10	0,6	1,11	10	0,7	1,24
11	1,8	4,51	11	1,6	3,97	11	0,4	1,17	11	0,4	0,94
12	1,0	2,10	12	1,0	2,14	12	0,4	0,76	12	0,4	0,87
13	1,3	2,13	13	1,3	2,09	13	1,0	1,65	13	1,0	1,61
14	0,7	1,10	14	0,7	1,17	14	0,6	0,85	14	0,7	1,11
A	0,7	1,44	A	0,6	1,31	A	0,6	1,39	A	0,5	1,14
B	0,4	0,80	B	0,4	0,84	B	0,6	1,16	B	0,4	0,76
C	0,5	0,97	C	0,5	0,99	C	0,5	0,88	C	0,5	0,83
E	1,1	2,81	E	1,1	2,62	E	0,5	1,52	E	0,5	1,44
H	1,5	3,43	H	1,5	3,35	H	0,2	0,40	H	0,3	0,63
I	1,8	3,00	I	1,9	3,11	I	0,7	1,05	I	0,9	1,36
J	1,9	3,76	J	2,2	4,50	J	4,8	11,67	J	4,8	11,50
K	1,2	2,11	K	1,2	2,03	K	0,5	0,76	K	0,9	1,25
P	1,7	3,53	P	1,7	3,47	P	0,3	0,56	P	0,6	1,08
Q	1,4	2,56	Q	1,3	2,38	Q	0,7	1,10	Q	0,6	0,98
R	6,1	12,10	R	6,1	12,17	R	7,2	14,84	R	6,9	14,31
S	2,2	5,35	S	2,8	6,90	S	8,4	22,03	S	8,2	21,29
						S'	0,2	0,49	S'	0,2	0,29
									T	0,5	0,84
moyenne:	4,13		moyenne:	3,97		moyenne:	2,64		moyenne:	2,51	
std dev.:	2,63		std dev.:	2,57		std dev.:	5,22		Std dev.:	4,97	
Moyenne (sans R):	3,81		Moyenne (sans R):	3,65		Moyenne (sans R, J, S):	0,87		Moyenne (sans R, J, S):	0,86	
Dev. std. (sans R):	2,12		Dev. std (sans R):	1,99		Dev. Std. (sans R, J, S):	0,42		Dev. Std. (sans R, J, S):	0,43	

Tableau I

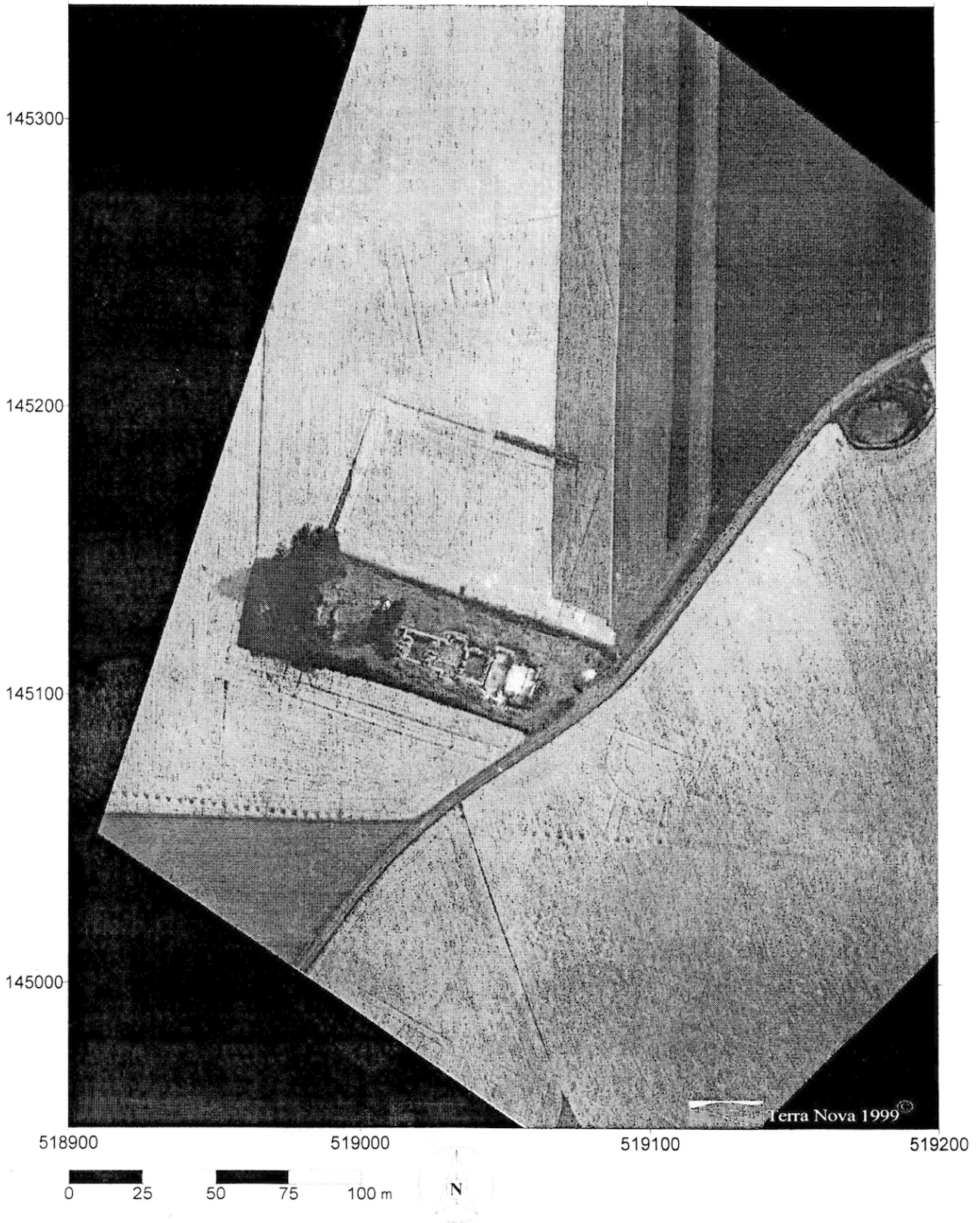


Fig. 5 : Résultat du redressement de la photographie A en utilisant les paramètres de l'annexe II.

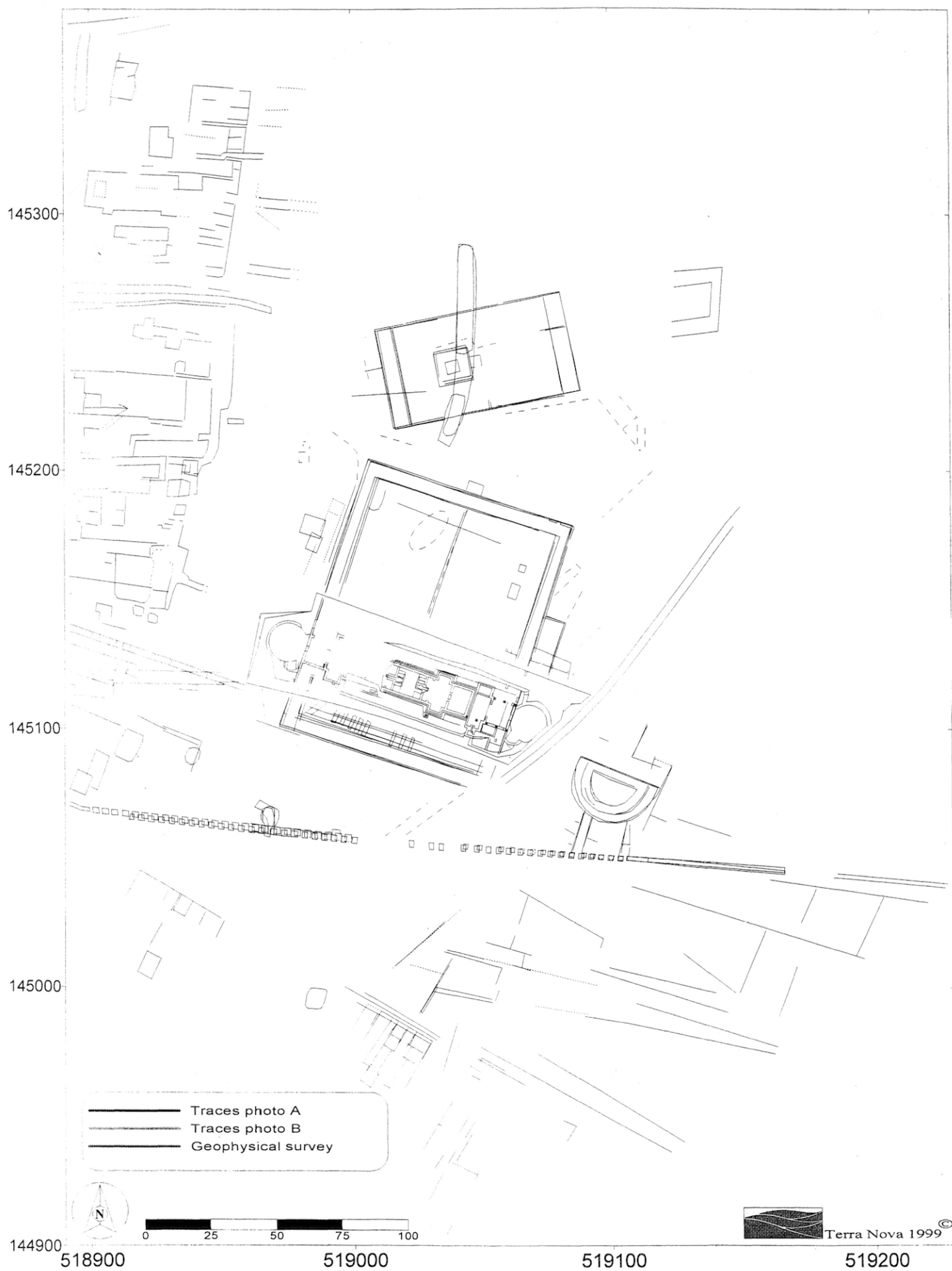


Fig. 6 : Superposition des traces digitalisées sur le cliché redressé A et B.

CONCLUSIONS

Les modèles développés dans cet article basés sur la méthode des quatre points montrent que les anomalies géophysiques peuvent être utilisées comme des points de calage dans un redressement de photographie aérienne. Ils sont équivalents aux points topographiques en terme de gain de précision. Ils peuvent être utilisés soit en points supplémentaires pour le redressement de clichés, soit être utilisés seuls en particulier pour des zones d'open-field où aucun repère topographique stable n'a pu être trouvé sur les clichés.

Le redressement des deux clichés aériens a permis d'obtenir une bonne image des structures archéologiques autour des thermes et ce avec une précision métrique (en absolu). L'orthophotographie a été fournie à l'archéologue dans un format numérique et géoréférencée permettant l'implantation ultérieure des limites de fouilles de manière précise.

On peut remarquer aussi sur l'orthophoto un certain nombre de détails intéressants qui étaient passés inaperçus auparavant : la section des piles de l'aqueduc au sud des thermes est plus grande au centre que sur les bords de la photo. Ceci a pu être mis en relation, après discussion avec l'archéologue, à une différence dans le modelé du terrain passé (paleothalweg) : la forme des piles change avec la position dans ce thalweg qui a été reconnu un peu plus au nord par une épaisseur des sédiments différente dans les thermes. Un autre fait aussi mis en évidence est l'écartement différent des piles juste au sud des thermes : une porte aurait existé pour laisser la place au trafic... Une relecture des notes de fouilles des archéologues du siècle dernier nous a conforté dans cette hypothèse.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier spécialement le Service Régional de l'Archéologie (SRA) de Basse-Normandie qui nous a permis d'exploiter les clichés de Roger Agache, ainsi que l'association Archeo27 pour le prêt de certains clichés.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide constante de Laurent Guyard, archéologue attaché à la mission à l'action culturelle du Conseil Général et qui est responsable de la mise en valeur du site de Vieil-Evreux.

Une partie de ce travail a été effectué sous forme de projet de fin d'études par Bertrand Chazaly (ENSAIS Strasbourg) avec le support financier de la compagnie Terra NovA sarl.

BIBLIOGRAPHIE

- AGACHE, R., 1978 - La Somme romaine et pré-romaine, *mémoire de la société des Antiquaires de Picardie*, Amiens, Tome 24, 515 p.
- CLIQUET, D., EUDIER, P., ETIENNE, A., BLASZKIEWICZ, P., BRUNET, B., MOESGAARD, J. et POIREL, E., 1996 - *Le Vieil-Evreux, un vaste site Gallo-Romain*, éd. Association Archéo27 sous l'égide de la publication du Conseil Général de l'Eure, 79 p.
- DELETANG, H., 1999 - *L'archéologie aérienne en France. Le passé vu du ciel*, éd. Errance, Paris, 173 p.
- FERDIERE, A., 1998 - *La prospection*, collection « Archéologiques », éd. Errance, Paris, 200 p.
- GANDON, J.F. et LANGOUET, L., 1992 - Un système de redressement informatisé des photographies aériennes obliques, *Revue d'Archéométrie*, vol. 16.
- HAIG, J., 2000 - Developing rectification programs for small computers, *Arch. Prospection*, Vol. 7, N°1, 1-17.
- PALMER, R., 1970 - A computer method for transcribing information graphically from oblique aerial photographs to map, *Journal of Archaeological Sciences*, Vol. 4, 283-290.
- SCOLLAR, I., TABBAGH, A., HESSE, A. & HERZOG, I., 1990 - *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*. -(Topics in Remote Sensing), Cambridge University Press, 674 p.

ANNEXE I : Calcul des coefficients différentiels de la matrice A

Les coefficients de la matrice A sont :

A:	X_0	Y_0	Z_0	ω	ϕ	κ	X'_0	Y'_0	f'
$V_{X'_1}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta X_0}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta Y_0}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta Z_0}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta \omega}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta \phi}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta \kappa}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta X'_0}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta Y'_0}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta f'}$
$V_{Y'_1}$	$\frac{\delta y'_1}{\delta X_0}$	$\frac{\delta y'_1}{\delta Y_0}$	$\frac{\delta y'_1}{\delta Z_0}$	$\frac{\delta y'_1}{\delta \omega}$...				
$V_{X'_2}$	$\frac{\delta x'_2}{\delta X_0}$	$\frac{\delta x'_2}{\delta Y_0}$...						
...	...								
$V_{X'_n}$	$\frac{\delta y'_n}{\delta X_0}$	$\frac{\delta x'_1}{\delta Y_0}$	$\frac{\delta y'_n}{\delta Z_0}$	$\frac{\delta y'_n}{\delta \omega}$	$\frac{\delta y'_n}{\delta \phi}$	$\frac{\delta y'_n}{\delta \kappa}$	$\frac{\delta y'_n}{\delta X'_0}$	$\frac{\delta y'_n}{\delta Y'_0}$	$\frac{\delta y'_n}{\delta f'}$

En notant

$$Z_x = r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)$$

$$Z_y = r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)$$

$$N = r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)$$

et en partant de l'équation générale (1) alors

$$\frac{\delta x'}{\delta X_0} = -\frac{f'}{N^2} (r_{13} Z_x - r_{11} N) \quad \text{et} \quad \frac{\delta y'}{\delta X_0} = -\frac{f'}{N^2} (r_{13} Z_y - r_{12} N)$$

$$\frac{\delta x'}{\delta Y_0} = -\frac{f'}{N^2} (r_{23} Z_x - r_{21} N) \quad \text{et} \quad \frac{\delta y'}{\delta Y_0} = -\frac{f'}{N^2} (r_{23} Z_y - r_{22} N)$$

$$\frac{\delta x'}{\delta Z_0} = -\frac{f'}{N^2} (r_{33} Z_x - r_{31} N) \quad \text{et} \quad \frac{\delta y'}{\delta Z_0} = -\frac{f'}{N^2} (r_{33} Z_y - r_{32} N)$$

$$\frac{\delta x'}{\delta \omega} = -\frac{f'}{N} \cdot \left\{ \frac{Z_x}{N} [r_{33} \cdot (Y - Y_0) - r_{23} \cdot (Z - Z_0)] - r_{31} \cdot (Y - Y_0) + r_{21} \cdot (Z - Z_0) \right\}$$

$$\frac{\delta y'}{\delta \omega} = -\frac{f'}{N} \cdot \left\{ \frac{Z_y}{N} [r_{33} \cdot (Y - Y_0) - r_{23} \cdot (Z - Z_0)] - r_{32} \cdot (Y - Y_0) + r_{22} \cdot (Z - Z_0) \right\}$$

$$\frac{\delta x'}{\delta \phi} = \frac{f'}{N} \cdot \left\{ \frac{Z_x}{N} [Z_x \cdot \cos \kappa - Z_y \cdot \sin \kappa] + N \cdot \cos \kappa \right\}$$

$$\frac{\delta y'}{\delta \phi} = \frac{f'}{N} \cdot \left\{ \frac{Z_y}{N} [Z_x \cdot \cos \kappa - Z_y \cdot \sin \kappa] - N \cdot \sin \kappa \right\}$$

$$\frac{\delta x'}{\delta \kappa} = -\frac{f'}{N} \cdot Z_y \quad \text{et} \quad \frac{\delta y'}{\delta \kappa} = \frac{f'}{N} \cdot Z_x$$

$$\frac{\delta x'}{\delta X'_0} = 1, \quad \frac{\delta x'}{\delta Y'_0} = 0, \quad \frac{\delta y'}{\delta X'_0} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\delta y'}{\delta Y'_0} = 1; \quad \frac{\delta x'}{\delta f'} = -\frac{Z_x}{N} \quad \text{et} \quad \frac{\delta y'}{\delta f'} = -\frac{Z_y}{N}$$

ANNEXE II : Calcul des paramètres pour le cliché A

Paramètres avant itération		Différences après itération		Paramètres après itération		Valeurs de départ	
a1:	1,09587E+00	Δa1:	4,227E-10	a1:	####	a1:	3,77971E+00
a2:	-2,60000E-01	Δa2:	-8,476E-11	a2:	####	a2:	-1,27787E+00
a3:	-8,16100E+02	Δa3:	-3,250E-07	a3:	####	a3:	-3,35989E+03
b1:	-3,50940E-01	Δb1:	-6,727E-11	b1:	####	b1:	-1,29312E+00
b2:	-5,94040E-01	Δb2:	-2,402E-10	b2:	####	b2:	-1,53835E+00
b3:	5,61554E+02	Δb3:	1,414E-07	b3:	####	b3:	1,93564E+03
d1:	5,74440E-04	Δd1:	5,479E-13	d1:	####	d1:	2,32955E-03
d2:	1,45988E-03	Δd2:	4,027E-13	d2:	####	d2:	5,23816E-03

Points de Calage				CP#	Différences photo		
Image (cliché)		terrain			photo (mm)	terrain (m)	
x	y	X	Y				
217,10	5,70	1194,13	218,93	E	-0,091	0,51	1,44
31,80	59,70	858,57	251,22	S'	-0,498	0,17	0,29
115,00	29,10	1008,70	254,70	6	0,014	0,72	1,46
162,40	135,30	978,66	8,17	K	0,673	0,89	1,25
65,10	143,00	853,90	60,12	I	0,268	0,87	1,36
182,70	53,50	1082,90	140,10	12	0,873	0,41	0,87
141,50	111,70	970,90	61,10	14	-0,175	0,72	1,11
151,50	74,50	1017,91	123,98	A	-0,813	0,53	1,14
174,40	69,20	1055,16	116,05	B	-0,305	0,38	0,76
173,80	39,70	1086,50	177,96	C	-0,260	0,48	0,83
150,20	45,40	1045,00	185,20	2	-0,314	0,07	0,17
228,70	130,30	1066,41	-28,37	T	0,634	0,52	0,84
					-0,346		
					0,195		
					0,491		
					-0,221		
					0,309		
					-0,461		
					0,132		
					0,021		
					0,065		
					-0,377		
					0,358		

inverse de (tA.A)							
0,0027	-0	-2,0854	-0,000633	-0,0013	1,08728	3,4E-06	3,5E-06
-0,0005	0	0,36558	0,00011	0,00026	-0,1964	-7E-07	-3E-07
-2,0854	0	1614,37	0,489067	0,99306	-839,64	-0,0026	-0,0028
-0,0006	0	0,48907	0,000159	0,0003	-0,266	-8E-07	-8E-07
-0,0013	0	0,99306	0,000301	0,00065	-0,5234	-2E-06	-2E-06
1,08728	-0	-839,64	-0,265995	-0,5234	450,449	0,00138	0,00141
3,4E-06	-0	-0,0026	-8E-07	-2E-06	0,00138	4,4E-09	4,2E-09
3,5E-06	-0	-0,0028	-8,49E-07	-2E-06	0,00141	4,2E-09	6,7E-09

ANNEXE III : Calcul des paramètres pour le cliché B

Paramètres avant itération		Différences itération		après Paramètres itération		après Valeurs de départ	
a1:	-4,59181E+01	δa1:	-9,449E-01	a1:	-4,6862975E+01	a1:	-1,98514E+01
a2:	1,48449E+01	δa2:	3,069E-01	a2:	1,5151824E+01	a2:	6,38683E+00
a3:	4,10234E+04	δa3:	8,437E+02	a3:	4,1867147E+04	a3:	1,77463E+04
b1:	1,35541E+01	δb1:	2,809E-01	b1:	1,3835055E+01	b1:	5,79936E+00
b2:	1,72423E+01	δb2:	3,558E-01	b2:	1,7598020E+01	b2:	7,43058E+00
b3:	-2,08868E+04	δb3:	-4,323E+02	b3:	-2,1319138E+04	b3:	-8,95564E+03
d1:	-3,91970E-02	δd1:	-7,895E-04	d1:	-3,9986476E-02	d1:	-1,74257E-02
d2:	-6,78567E-02	δd2:	-1,399E-03	d2:	-6,9255671E-02	d2:	-2,92409E-02

Points de Calage				CP#	Différences photo		
Image (cliché)		terrain			photo (mm)	Terrain (m)	
x	y	X	Y				
27,10	50,50	1008,70	254,70	6	-0,007 -0,075	0,08	0,17
64,20	162,10	970,90	61,10	14	-0,151 0,129	0,20	0,18
77,40	26,50	1081,20	269,40	16	-0,105 -0,101	0,15	0,31
81,60	105,80	1017,91	123,98	A	-0,336 1,128	1,18	1,77
115,00	57,70	1086,50	177,96	C	-0,996 0,085	1,00	1,13
174,00	15,40	1194,13	218,93	E	-0,057 0,127	0,14	0,34
150,00	82,20	1092,50	112,90	H	-0,879 -1,308	1,58	2,53
98,90	198,60	978,66	8,17	K	-1,153 1,287	1,73	1,51
28,70	131,30	959,54	117,73	Q	-0,204 0,108	0,23	0,22
190,70	91,80	1118,80	76,90	U	-0,850 0,343	0,92	1,03
115,10	121,10	1033,60	82,80	V	-0,301 0,353	0,46	0,56
224,40	182,40	1069,60	-36,40	W	-0,041 -0,071	0,08	0,08

inverse de (tA.A)

0,17033	-0	-152,24	-0,051267	-0,064	78,606	0,00014	0,00026
-0,0546	0	48,824	0,016439	0,02054	-25,21	-5E-05	-8E-05
-152,24	49	136075	45,82204	57,1877	-70256	-0,1269	-0,2292
-0,0513	0	45,822	0,015454	0,01925	-23,684	-4E-05	-8E-05
-0,064	0	57,1877	0,019253	0,02406	-29,527	-5E-05	-1E-04
78,606	-25	-70256	-23,68371	-29,527	36302,1	0,06554	0,11837
0,00014	-0	-0,1269	-4,27E-05	-5E-05	0,06554	1,2E-07	2,1E-07
0,00026	-0	-0,2292	-7,72E-05	-1E-04	0,11837	2,1E-07	3,9E-07

ANNEXE IV : Comparaison des redressements pour le cliché A

CAS 1: Sans les CP géophysiques
(A,B,C,E,I,K,S',T,P,Q,R,H)

CAS2: Avec les CP géophysiques
(2,6,12,14,A,B,C,E,I,K,S',T)

paramètres:		paramètres:	
a1:	1,05933E+00	a1:	1,09198E+00
a2:	-2,58013E-01	a2:	-2,55028E-01
a3:	-7,87461E+02	a3:	-8,13982E+02
b1:	-3,41769E-01	b1:	-3,50765E-01
b2:	-5,78708E-01	b2:	-5,85202E-01
b3:	5,46545E+02	b3:	5,59422E+02
d1:	5,29691E-04	d1:	5,60151E-04
d2:	1,39441E-03	d2:	1,50800E-03

Points de Calage		terrain		CP#	Diff. Photo (mm)		Diff. terrain (m)	
Image (cliché)		X	Y		CAS 1 (x/y)	CAS 2 (X/y)	CAS1	CAS2
x	y							
124,90	46,50	1005,80	203,90	1	0,855/-0,165	0,602/-0,131	1,46	1,03
150,20	45,40	1045,00	185,20	2	0,208/0,019	0,021/0,065	0,36	0,17
127,40	40,30	1016,00	215,90	3	0,656/-0,132	0,389/-0,318	1,14	0,70
130,50	38,70	1022,90	217,10	4	0,328/0,039	0,063/0,049	0,58	0,17
145,60	30,50	1054,80	223,10	5	-0,058/0,049	-0,298/0,032	0,16	0,52
115,00	29,10	1008,70	254,70	6	1,017/0,306	0,673/0,268	2,06	1,46
117,80	27,40	1014,90	255,60	7	0,745/0,069	0,404/0,025	1,35	0,73
128,70	27,70	1031,90	244,70	8	0,232/0,015	-0,073/-0,022	0,41	0,15
134,90	24,40	1044,90	247,80	9	0,360/0,163	0,063/0,111	0,81	0,33
138,70	27,70	1048,00	235,30	10	-0,424/-0,019	-0,695/-0,052	0,75	1,24
133,00	31,00	1034,70	232,10	11	0,106/-0,307	-0,173/-0,326	0,81	0,94
182,70	53,50	1082,90	140,10	12	-0,196/-0,411	-0,260/-0,314	1,03	0,87
131,30	93,50	972,00	102,40	13	1,126/-0,058	1,041/0,043	1,72	1,61
141,50	111,70	970,90	61,10	14	0,658/-0,438	0,634/-0,346	1,24	1,11
151,50	74,50	1017,91	123,98	A	0,308/0,375	0,195/0,491	0,98	1,14
174,40	69,20	1055,16	116,05	B	-0,151/0,180	-0,221/0,309	0,46	0,76
173,80	39,70	1086,50	177,96	C	-0,345/0,095	-0,461/0,132	0,62	0,83
217,10	5,70	1194,13	218,93	E	-0,170/-0,353	-0,091/-0,498	1,05	1,44
196,30	61,70	1092,50	112,90	H	0,044/-0,407	0,034/-0,276	0,93	0,63
65,10	143,00	853,90	60,12	I	-1,028/-0,164	-0,813/-0,305	1,55	1,36
97,00	42,80	969,72	224,45	J	-2,572/-3,861	-2,875/-3,842	11,21	11,50
162,40	135,30	978,66	8,17	K	0,840/-0,237	0,873/-0,175	1,24	1,25
186,80	79,40	1060,14	85,93	P	0,403/-0,590	0,379/-0,432	1,40	1,08
119,50	89,90	959,54	117,73	Q	0,733/-0,073	0,629/0,016	1,13	0,98
191,40	69,90	1088,64	109,69	R	-3,710/5,722	-3,723/5,858	14,01	14,31
26,20	45,90	858,99	268,34	S	-2,915/-7,499	-3,228/-7,513	20,91	21,29
31,80	59,70	858,57	251,22	S'	0,097/0,019	-0,171/0,014	0,18	0,29
228,70	130,30	1066,41	-28,37	T	-0,454/0,165	-0,377/0,358	0,71	0,84
Moyenne (sans R, J et S)							0,96	0,87